CAFE-2 同步定时触发系统设计

李婧宇[1,2]，杨锋[1]，郭玉辉[1]，陈又新[1]，崔文娟[1]，李姣赛[1]

（1 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2 中国科学院大学，北京，100049）

摘要：CAFE-2 是中国科学院近代物理研究所于 2021 年建造、用于开展超重新核素合成、超重元素化学性质、超重核结构和性质等方面的研究的超导直线加速器。同步定时触发系统是CAFE-2的重要子系统，在CAFE-2的运行中起着关键性的作用。为了满足CAFE-2 在加速器调试及终端运行两种运行模式下不同运行时序及同步触发的需求，CAFE-2 主同步定时系统采用了经典的基于事件的定时方案，同时通过耦合电路及联锁逻辑设计，在终端运行模式下将旋转靶调制的同步脉冲信号与主定时 CW(Continuous-wave)模式下的触发信号进行耦合，解决了 CAFE-2 在终端运行模式下触发信号必须与旋转靶脉冲信号同步的难题。本文介绍了CAFE-2同步定时触发系统的结构，并阐述了CAFE-2在不同运行模式下同步定时触发系统的工作原理与方案。

关键词：超导直线加速器；超重元素；定时系统；同步触发；CAFE-2；旋转靶；工作模式
中图分类号：TL503.7,TP29　　　　**文献标志码**：A

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（B 类）（批准号：XDB34010000）

第一作者：李婧宇（1999—），女，安徽淮北人，硕士研究生，从事加速器控制技术研究, E-mail: lijingyu@impcas.ac.cn

通信作者：杨锋，E-mail: yangf@impcas.ac.cn

0 引言

发现和合成新元素来扩充元素周期表一直以来是核物理与化学的前沿研究领域之一[1, 2, 3]。中国科学院近代物理研究所（IMP，Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences）于 2001 年开始了超重核素合成研究工作[4]。2021 年，IMP 对 CAFE（the China ADS Front-end demo）超导直线加速器进行了升级改造[5, 6, 7]，同时增加了超重试验终端 SHANS2[8, 9]（Spectrometer for Heavy Atoms and Nuclear Struture-2），建成了中国超重元素研究加速器装置 CAFE-2（China Accelerator Facility for superheavy Elements），致力于在超重元素研究领域开展超重新核素合成、超重元素化学性质、超重核结构和性质等方面的研究。

超导直线加速器具有极强的“自损伤”特性，这对 CAFE-2 控制系统的设计提出了更高的要求。同步定时触发系统作为 CAFE-2 的核心子系统，精确控制着加速器粒子束的产生、注入与加速过程。它不仅负责为加速器及超重试验终端时序相关的设备提供稳定、准确的时间基准，产生并分配低抖动的同步时钟信号与触发信号，同时也为分布于整个束线的束流诊断设备采集到的数据标记全局的时间戳，以保证采集数据的时间相关一致性。

CAFE-2 主要由超导直线加速器及超重实验终端 SHANS2 组成。超导直线加速器能够提供能量可调的强流重离子束流 ，主要包括：电子回旋共振(ECR)离子源、低能传输线（LEBT）、射频四极杆(RFQ)加速器、中能传输线（MEBT）、超导加速段（CM1-4）、高能传输线（HEBT）；SHANS2 主要包括差分抽气系统、靶系统、主偏转磁铁、小角度偏转磁铁、三个四极磁铁、工作气体维持系统、收集测量系统。CAFE-2 的布局图如图 1 所示：



图 1 CAFE-2 装置布局图

CAFE-2 驱动粒子束，经过低能、中能、高能及超导段加速后，轰击终端放置在转向靶上的稀有元素并发生熔合蒸发反应，产生研究人员感兴趣的目标核。为了保证靶的温度保持在熔点以下，CAFE-2 超重实验终端采用了如图 2 所示的旋转靶。转靶以 2000 转/分的速

度高速旋转。20 个扇形靶区均匀分布于旋转靶转盘，扇形靶区之间设置有 20 个矩形孔。为了避免转盘受到束流照射，在垂直于孔的两端安装了红外发射接收及光电转换电路，当靶旋转时，可产生延迟和脉宽可调的同步触发脉冲信号，使用该信号对加速器产生的 CW 束进行调制，产生同步于转靶的脉冲束。

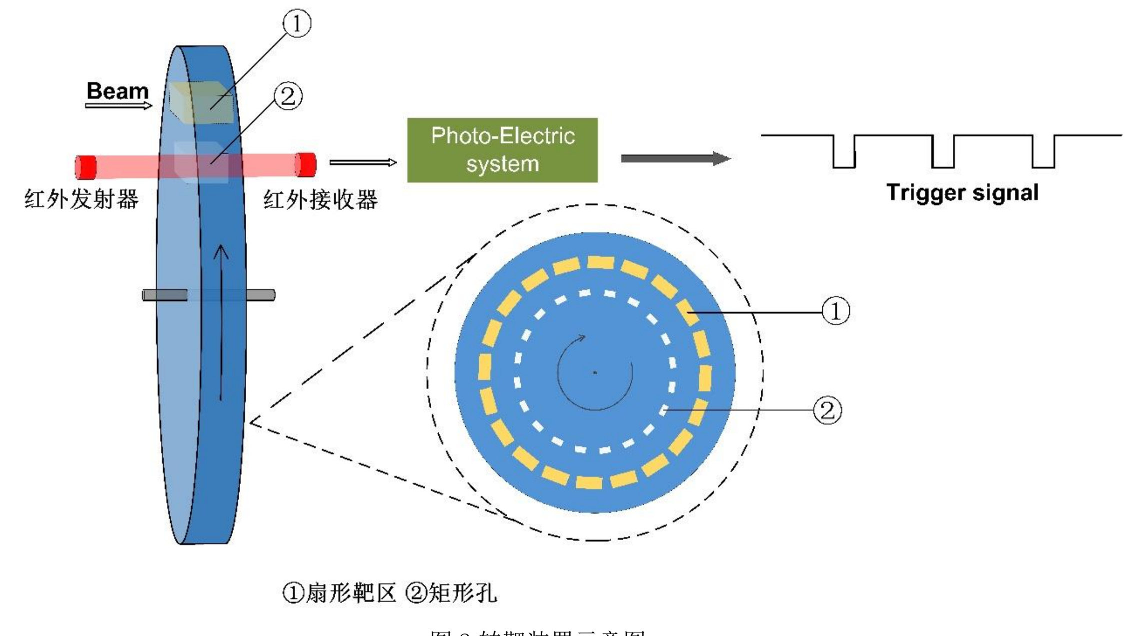


图 2 转靶装置示意图

1 CAFE-2 同步定时触发系统需求

如同所有大型、结构复杂的粒子加速器[10, 11, 12, 13]，CAFE-2 必须设计一套高精度、高可靠性、低时间抖动的全局同步定时触发系统，用于同步分布于加速器周围的子系统或设备，如微波机、Chopper 电源、LLRF 低电平前馈控制、束诊 BPM (Beam Position Monitor)、BLM (Beam Loss Monitor)、ACCT (Ac Current Transformer)等，确保加速器能够精确地生成超重终端所需的粒子束，粒子束经过加速、引出、并准确的轰击到匀速旋转转靶上的 20 个扇形靶区。超重终端旋转靶及其靶区的稀有元素造价高昂，为避免高能束流造成不可预估的破坏，CAFE-2 必须具备两种主要的机器运行模式：1. 加速器调试模式，2. 终端运行模式。在两种运行模式下，CAFE-2 同步定时触发系统必须满足以下的需求：

1. 在加速器调试模式，由同步定时触发系统生成并向整个装置分发低抖动、高精度的时钟信号与触发信号（TTL 触发电平/软件触发事例）；

2. 在加速器调试模式，由同步定时触发系统为分布于整个束线的束流诊断设备采集到的数据提供精确的时间基准，以保证采集数据的时间相关一致性；

3. 在终端运行模式，同步定时触发系统生成的触发信号必须与旋转靶产生的脉冲信号

同步；

在 CAFE-2 处于启动、故障、束流参数调整等状态时，CAFE-2 必须在加速器调试模式下以脉冲束（束流重复周期为 1-50 Hz，脉宽<=20 us）的形式运行。操作人员通过上层软件，对同步定时触发系统所有参数（如时钟信号的脉宽、延迟、触发事例码、输出通道等参数）进行预置，并下发至同步定时触发系统所有的子节点，加速器所有的设备及子系统严格按照同步定时触发系统预设的同步触发时序进行动作。基于准确的时间基准，同步定时触发系统在准确的时间触发离子源的微波机及高压斩波器，产生并注入几十微秒的脉冲束，经过精确延时的脉冲信号同步触发 RFQ 的加速电场及束流诊断设备，同步定时触发系统触发的设备如表 1 所示。束流经过低能、中能、高能及超导段加速后，轰击在高能直线段 dump 上，整个过程中超重终端所有设备不参与装置运行。

表 1 同步触发设备列表

序号	触发设备类型	触发动作的目标	触发设备位置
1	微波机	微波功率馈入离子源弧腔，产生脉冲束流	离子源
2	LEBT chopper	高压斩波离子源束流，控制直线加速器束流脉冲占空比	LEBT
3	LLRF	对腔体幅度和相位进行前馈补偿	RFQ，MEBT，超导段
4	BPM、BLM、FC、ACCT	确定束诊设备的测量区间	LEBT，MEBT，超导段，HEBT
5	其他束诊元件	确定束诊元件的测量区间	LEBT，MEBT，HEBT

操作人员在运行过程中对束流的状态进行实时监测与调整，当加速器设备及束流状态达到超重终端所需条件时，CAFE-2 方可切换至终端运行模式。当 CAFE-2 进入终端运行模式，加速器以 CW 束的形式运行并向超重终端提供束流，此时，超重终端旋转靶以 2000 rpm 的速度高速旋转,同时产生延迟和脉宽可调的脉冲信号，通过该信号对加速器产生的 CW 束进行调制，产生同步于转靶的脉冲束。

两种机器运行模式下的时序分析图分别如图 3 和图 4 所示。

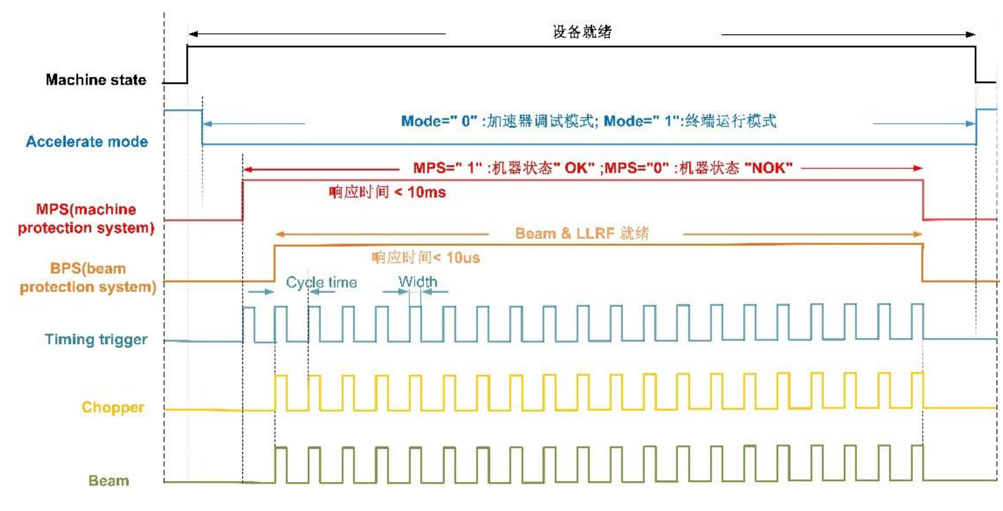


图 3 加速器调试模式下的加速器时序图

如图 3 所示，CAFE-2 在加速器调试模式下（Accelerate Mode=0），同步定时触发系统根据物理人员提前预置的参数（重复周期、脉宽、延时），提供周期、延时及脉宽精确可调的同步触发数字脉冲信号，在准确的时间触发离子源的微波机和斩波器高压电源，使其产生并引出几十微秒至几毫秒的脉冲束，同时，同步触发 LLRF 低电平控制系统及束流诊断设备，进行 RFQ 腔体功率、幅度及相位的前馈补偿及束流信号的同步数据采集与分析。

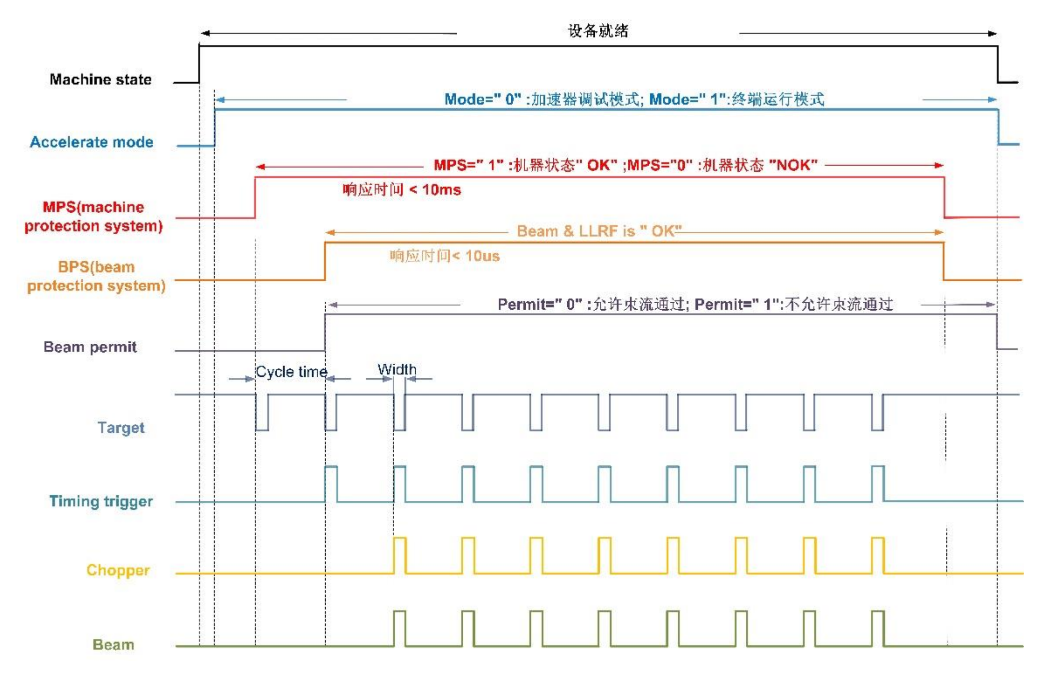


图 4 终端运行模式下的加速器时序图

如图 4 所示，CAFE-2 在终端运行模式下（Accelerate Mode=1），同步定时触发系统进入 CW 触发模式（占空比=100%），此时超重终端所有设备参与运行，通过耦合调制电路，旋转靶旋转产生的同步触发脉冲信号对同步定时触发系统的触发脉冲信号进行耦合调制，使得同步定时触发系统所有触发信号与转靶产生的脉冲信号保持同步。

2 CAFE-2 同步定时触发系统设计

为了满足 CAFE-2 同步定时触发的需求，CAFE-2 设计了相对独立的、基于 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)软件架构的同步定时触发系统，整个系统架构如图 5 所示：

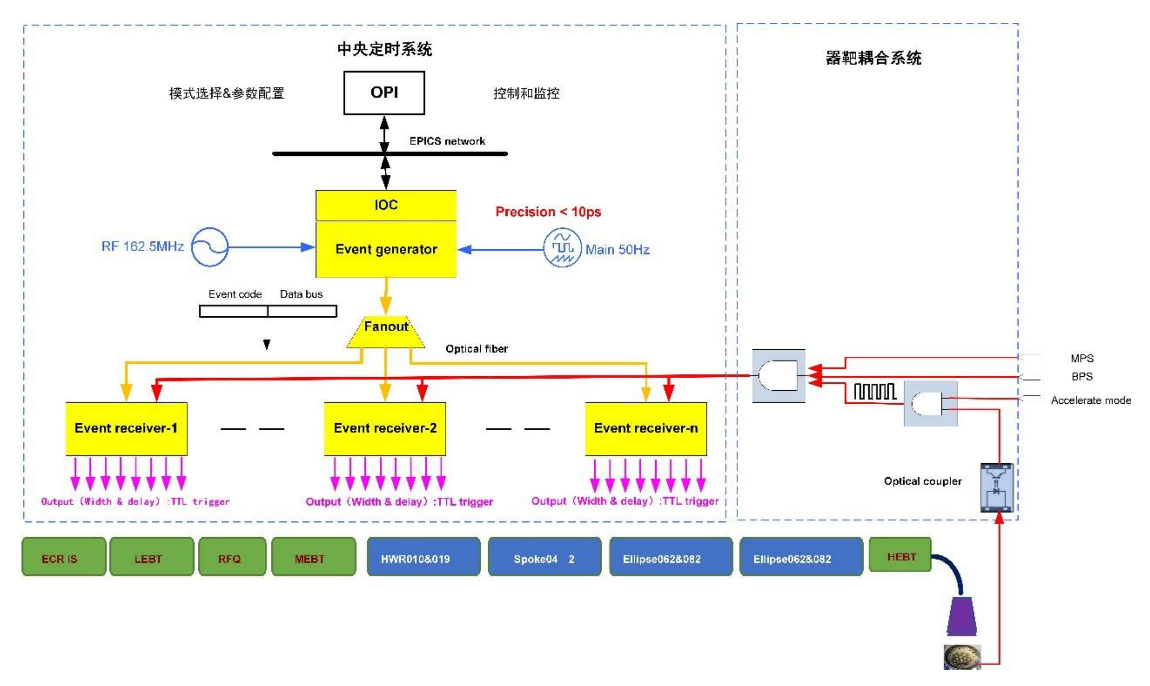


图 5 同步定时触发系统架构图

CAFE-2 同步定时触发系统由两部分组成：1. 加速器中央定时系统，2. 器靶耦合调制系统。其中，加速器中央定时系统采用了经典的基于事件的时间系统（event-based timing system），用于产生并发布同步分布于加速器及超重试验终端周围的设备和子系统的参考时钟和同步触发信号；器靶耦合调制系统采用耦合调制电路，利用旋转靶光电转换系统产生的脉冲信号，对加速器产生的 CW 离子束进行耦合调制，产生同步于转靶的脉冲束，同时耦合调制系统根据不同的运行模式，由不同的内部联锁逻辑将加速器中央定时系统的硬件安全联锁信号耦合于转靶输出的脉冲信号中。

2.1 加速器中央定时系统

加速器中央定时系统采用基于事例的时间系统[14, 15, 16]。由于超导直线加速器高流强、高功率，具有较强的自毁特性，所以加速器必须利用几十微秒到几毫秒的脉冲束进行调试。一方面通过低占空比脉冲束检验各个元件是否能够工作；另一方面通过扫相的方式来确定纵向的相位，以此来保证束流的品质。在加速器调试模式下（Accelerate Mode=0），操作人员通过中央定时系统，产生延时精确的数字脉冲信号，在正确的时间触发粒子源、低电平、束流控制、束流诊断、束流测量等设备。

中央定时系统主要设计参数如表 2 所示，CAFE-2 加速器以 1-50 Hz 的重复频率运行，该频率与装置主动力电源的 50 Hz 供电频率同步，中央定时系统的基准时钟必须与 RF 频率(RF freq)进行同步锁相，中央定时系统的时间抖动小于 10 ps，分频系数为 n，事件时钟周期为 n/(RF freq)，触发通道粗延时步长依赖于输入的 RF 参考时钟及分频系数，为(n/(RF freq))/20，触发通道细延时步长由单独的专用芯片实现，为 5 ps，设置 n 为 2。

表 2 中央定时系统设计参数表

参数名称	参数值
束流重复频率	1-50 Hz
RF 频率	162.5 MHz
事件时钟频率（ RF 频率/2)	81.25 MHz
RMS 抖动	<10 ps
触发粗延时步长	0.615 ns
触发细延时步长	5 ps
频率(AC freq/n)	50 Hz/n
运行模式	加速器调试模式/终端运行模式

如图 5 所示，CAFE-2 加速器中央定时系统主要由中央定时 IOC（Input-Output Controller）服务器、事例发生器（EVG）模块、扇出器（FOUT）模块、事例接收器（EVR）模块以及连接各模块之间的高速传输光纤组成。该系统是基于标准 VME（Versa Module Eurocard）工业计算机、FPGA 及高速光纤通信技术的高性能、可扩展的事件定时系统，支持标准高速 VME 背板总线、同时支持 EPICS 系统的软件集成。其中 EVG 通过扇出器及星形拓扑光纤网络向事例接收器广播事例数据帧。每一个事件帧由一个 8 位事件码与一个 8 位分布式数据总线组成，数据帧采用 8B/10B 方式编码。EVR 接收并解码 EVG 传输的定时信息，并输出符合定义的输出触发脉冲。扇出器及多模玻璃光纤组成星形拓扑事件信息传输网络，以保证定时网络的可靠性、安全性与抗干扰能力。IOC 服务器在 vxWorks 环境下运行基于 base-3.14.12 的 IOC，实现同步定时触发系统与上层 EPICS 的数据通信与信息交互。操作界面（OPI,Operator Interface）采用 CS-Studio(Control System Studio，基于 Phoebus-4.6.0)进行人机交互界面的开发，用于同步定时触发系统参数的配置、系统实时状态的监测与控制。

CAFE-2 加速器中央定时系统通过将 RF 主振荡频率 162.5 MHz 除以 2 进行分频，作为中央定时系统的事件时钟，以这个时钟的整数时标的次数来定义加速器离子束的宏脉冲长度，以确保 RF 与束流相位的锁定。整个加速器束流周期重复频率为 1-50 Hz。同时中央定时系统也同步到交流电力线 50 Hz 相位，以减少主动力供电涟漪效应对束流的影响。

目前，世界上各大加速器实验室多采用商业化的事件定时系统，如芬兰 MRF 公司基于

MRF 卡的事件定时系统[17]。CAFE-2 中央定时系统采用了上海应用物理研究所（SINAP）研发的事件定时系统产品[18, 19]，如图 6 所示。

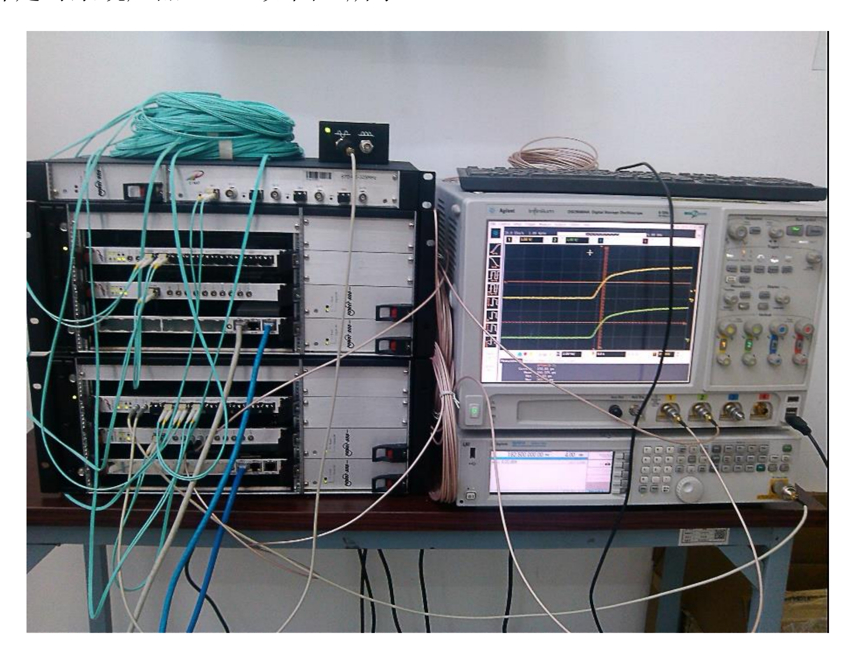


图 6　同步定时触发系统

SINAP 的事件定时系统产品利用了 FPGA 芯片作为 EVG 和 EVR 模块的主控制器，采用 2.5 Gbps 的 SFP 光模块通过万兆光纤传送事件码。EVG 通过“RF IN”输入端引入 162.5 MHz 的高频信号源，提供 3-5 dBm 正弦信号；通过“AC IN”输入端连接至 AC 50 Hz 模块，提供 50 Hz 信号，用于产生发送事例周期；将其 8 路光纤输出端，用光纤线连接至各 EVR 的上行输入端口，用于向各 EVR 发送事例。EVR 的 8 路输出端口连接至各需要触发的设备，每个通道提供可编程延迟，分为 1/20 事件时钟周期 (0.615 ns)的粗分辨率和 5 ps 的细分辨率。定时网络基于 OM3 多模玻璃光纤，在 250 米以上的距离以 2.5 Gbps 的速率运行，为了最大限度地减少光链路上热漂移的影响，光纤的长度在每一级上都是相等的。

加速器中央定时系统通过采用标准、商业的事件定时模块以及高可靠性、低时延的光纤传输网络设计，利用灵活开放的 EPICS 系列软件进行系统集成，在保证时间抖动小于 10 ps 的基础上，各 EVR 输出通道的时钟同步精度等于 0.615 ns。保证了 CAFE-2 在加速器调试模式下的同步触发需求。

2.2 器靶耦合调制系统

2021 年，超导直线加速器进行升级改造，成为超重元素合成研究装置。这时，对加速器中央定时系统提出了新的挑战：CAFE-2 在终端运行模式下，EVR 输出通道的触发脉冲信号在保证原有定时系统性能的基础上，其输出必须由超重终端旋转靶产生的脉冲信号进

行同步。为此， CAFE-2 在原中央定时系统的基础上，增加了器靶耦合调制系统，通过耦合调制电路的设计，使得 CAFE-2 同步定时触发系统可支持两种运行模式，通过改变加速器运行模式信号的状态值，可将同步定时触发系统从加速器调试模式快速切换至终端运行模式，使得同步定时触发系统所有触发信号与旋转靶产生的脉冲信号保持同步。

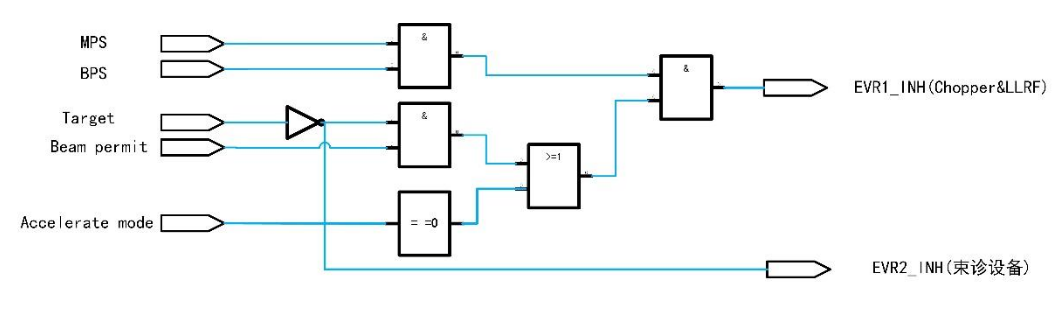


图 7 器靶耦合调制系统逻辑图

整个器靶耦合调制系统的控制逻辑如图 7 所示，旋转靶光电转换系统产生的脉冲信号经高速光纤引入耦合调制电路，同时引入的还有加速器运行模式信号、终端束流允许信号、机械安全及束流保护联锁信号。通过耦合调制电路的组合逻辑，器靶耦合调制系统最终输出两路 TTL 电平，分别输入至两组 EVR 的 INH 端口。其中，EVR1 负责输出 Chopper、LLRF 等设备的触发脉冲，脉冲信号的输出会被 MPS 及 BPS 联锁信号中止。EVR2 负责输出束诊等相关设备的触发脉冲，在终端运行模式下，其输出的触发脉冲与旋转靶产生的脉冲信号同步。

器靶耦合调制系统利用了 EVR 各通道的“interlock”功能，当通道的“interlock”功能被设置为“使能”时，其输出受 INH 口输入控制，若 INH 口接收到的外部联锁信号为 0，EVR 会立即中止该通道的输出。EVR1 的“interlock”功能在两种模式下均被设置为“使能”，EVR2 则会随模式切换变化。如图 5 所示，当定时系统在加速器调试模式下（Accelerate Mode=0）完成束流调试，操作人员会通过 OPI 中央定时控制界面人工切入终端运行模式（Accelerate Mode=1），OPI 系统自动加载终端运行模式下的参数配方，同时将中央定时系统配置为 CW 触发模式，即将 EVR 所有通道的输出脉冲占空比设置为 100%使其输出连续束，并将 EVR2 所有通道的“Interlock”功能设置为“使能”。

在加速器调试模式下，Accelerate Mode 信号为 0，EVR1 的 INH 口输入为 MPS 和 BPS 联锁信号，与旋转靶脉冲信号无关。在终端运行模式下，Accelerate Mode 信号为 1，当 MPS 信号、BPS 信号、Beam Permit 信号均为 1 时，Target 信号经处理后以“TTL”电平信号的形式被输送到 EVR1 的 INH 口，通过 EVR 的“Interlock”功能控制 Chopper、LLRF 等设备与旋转靶脉冲信号保持同步；MPS 信号、BPS 信号或 Beam Permit 信号为 0，EVR1 也

会中止输出。另外，旋转靶脉冲信号取反后直接输入至 EVR2 的 INH 口，控制束诊相关设备与旋转靶脉冲信号保持同步。

器靶耦合调制系统通过模拟耦合调制电路的设计，解决了 CAFE-2 在终端运行模式下定时系统触发信号必须与旋转靶同步的需求，EVR 各通道输出的触发脉冲与旋转靶脉冲信号同步误差小于 25 ns。同时，加速器在设备状态与束流状态发生异常时，定时系统能够快速切断触发脉冲的输出，停止加速器束流的产生与输出，保证了 CAFE-2 装置设备及束流的安全。

2.3 同步定时触发系统软件设计

CAFE-2 同步定时触发系统软件主要由 IOC 及人机操作界面 OPI 组成。它实现了对同步定时触发系统当前运行状态的监测、运行/停止的控制、EVR 各路脉冲信号的延时和脉宽等参数的设置及远程控制。

如图 5 所示，同步定时触发系统操作员界面通过装置局域网与系统软件输入输出控制器相连，二者通过基于 EPICS 的 CA（Channel Access）协议进行通讯及信息交互。操作人员通过操作员界面进行同步定时触发系统运行模式、运行参数的选择与设置，并将所有参数与控制命令通过高速以太网下发至定时服务器中的 IOC 中。各部分具体实现如下。

实验物理及工业控制系统 EPICS，是上世纪 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)和阿贡国家实验室(ANL)等联合开发的大型控制软件系统，主要用于为大型粒子加速器、望远镜和其它科学实验装置创建分布式软件实时控制系统。CAFE-2 也采用了 EPICS 来实现控制系统的软件集成与开发，保证 CAFE-2 控制系统良好的扩展性与稳定性。为此，CAFE-2 中央定时系统也为接入 EPICS 控制系统提供了必要的接口。

同步定时触发系统的 IOC 运行在 VME 主控器的 Vxworks 系统，服务器采用了基于 VME 总线的工业计算机，在 VME64x 机箱中插入了 VME PowerPC 板卡、SINAP VME-EVG、SINAP VME-Fanout、SINAP VME-EVR。其中，主控器通过 1000 Mbps Ethernet 接口与装置局域网相连。通过对主控器 Vxworks 系统中的 IOC 及网络进行配置，VME 机箱中所有板卡（EVG、EVR、Fout）的参数均会通过以太网以 PV（Process Variables）变量的形式在局域网中进行发布，以方便 OPI 进行远程读取与操作。

CAFE-2 同步定时触发系统的操作界面使用 CS-Studio(Phoebus-4.6.0)进行设计。CS-Studio 是用于监视和操作大型控制系统（例如加速器控制系统）的工具和应用程序的集合。CS-Studio 的原始实现基于 Eclipse RCP（Rich Client Platform）框架，该框架提供了可扩展和可插拔的架构。“Phoebus”是当前 CS-Studio 的变体，相比原来的开发，不再依赖

Eclipse RCP。相反，它提供了 Display Builder，Data Browser，Probe，PV Tree，Alarm，Scan，并在更紧凑的软件包中集成电子邮件、日志等功能。目前，CAFE-2 正在运行使用的同步定时触发系统操作界面如图 8、图 9 所示。

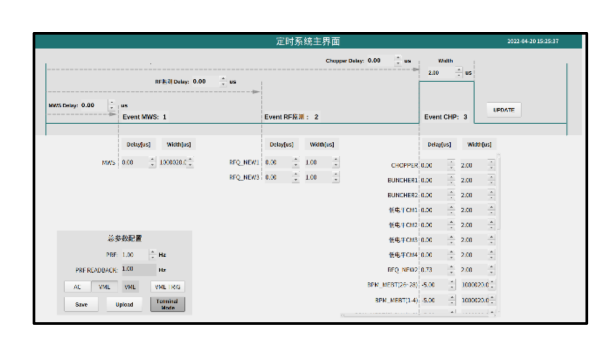


图 8 加速器调试模式控制界面

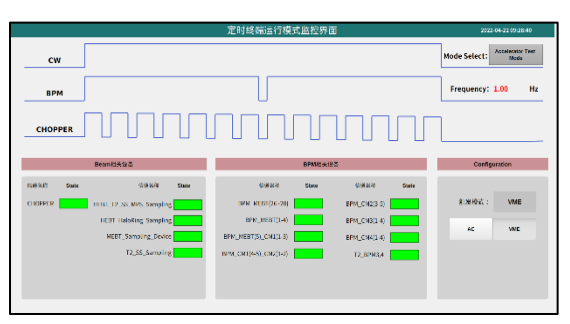


图 9 终端运行模式控制界面

3 系统测试

中国超重元素研究加速器装置已经于 2021 年完成设备安装并已经成功出束。在实验室和加速器运行中，对同步定时触发系统的性能进行了测试。如图 10 所示，其中左图为初始固定延迟（460 ps）；中图设置通道二（绿色）粗延时步数为 0，细延时步数为 200，相较于通道一（黄色）的延迟为 1.38 ns；右图设置通道二粗延时步数为 2，细延时步数为 0，相较于通道一延迟（1.64 ns）。经计算，测试结果表明，在运行条件下，细延时步长为 4.6 ps，粗延时步长为 0.6 ns。

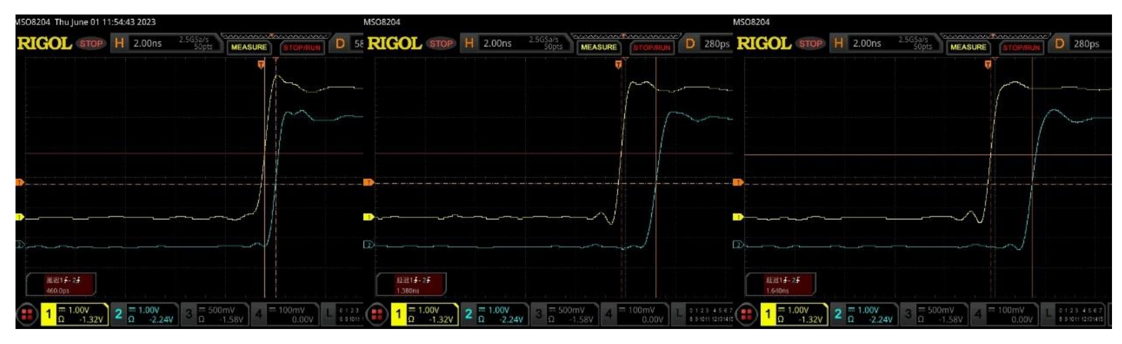


图 10 延时步长测试结果

通过示波器对 EVR 触发信号进行了时间抖动测试，结果显示系统的时间抖动标准偏差(Std Dev, Standard Deviation) 小于 10 ps，满足目前的物理需求，如图 11 所示，信号为 EVR 输出的触发信号，Std Dev 为 6.333 ps。

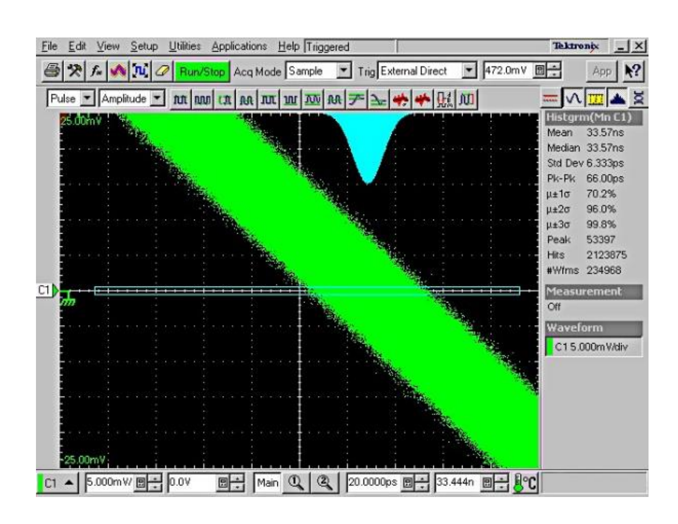


图 11 抖动测试结果

同时，测试了器靶耦合系统的调制响应功能。在终端运行模式下，当旋转靶匀速旋转时，耦合调制信号会将旋转靶旋转产生的同步触发脉冲信号与同步定时触发系统的 CW 脉冲信号进行耦合调制，使得同步定时触发系统所有触发信号与转靶产生的脉冲信号保持同步。系统单周期波形变化如图 12 所示，其中黄色信号为 CW 连续脉冲信号，绿色信号为旋转靶同步触发脉冲信号，粉色信号为耦合调制后的输出信号。

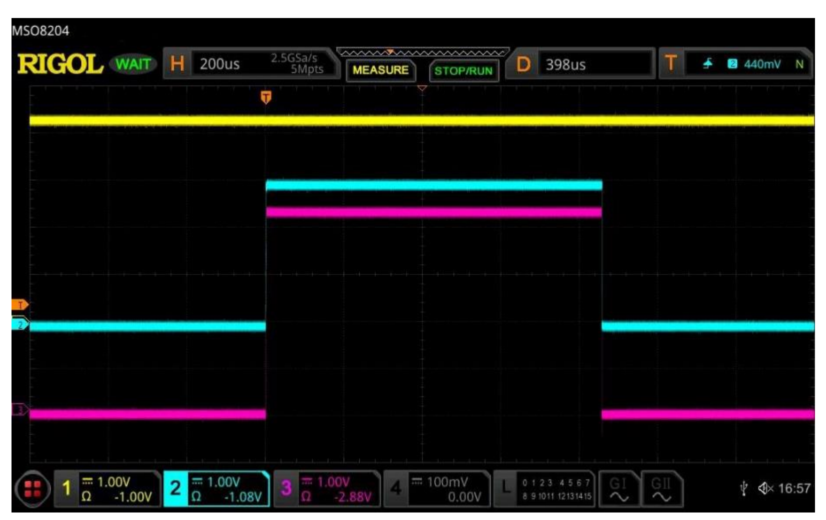


图 12 单周期波形变化

耦合调制信号相较于旋转靶产生的触发信号延迟如图 13 所示，其中左图为上升沿，右图为下降沿，通道一（黄色）为旋转靶同步触发脉冲信号，通道二（绿色）为耦合调制后的输出信号，延迟为 22.8 ns。



图 13 耦合调制信号延迟

CAFE-2 同步定时触发系统已在线运行超过两年的时间，期间从未出现过因同步定时触发系统故障而引发的触发中断或误触发的现象，系统的可靠性和稳定性得到了现场设备的运行检验。

4 结 论

本文介绍了 CAFE-2 同步定时触发系统的设计，提出并实现了基于耦合调制方案的时序控制系统，解决了两种模式下同步定时触发系统不同的信号源的冲突，介绍了系统的架构、软硬件设计和实现方案，实现了两种模式下的灵活切换，满足了 CAFE-2 运行稳定性、灵活性的需要。作为 CAFE-2 控制系统的核心子系统，同步定时触发系统在运行过程中扮演着重要的角色，这一方案的提出与实现是 CAFE-2 稳定供束的基本保障，也是超重新元素和新核素合成的基础。

参考文献

[1] SCHWERDTFEGER P, SMITS O R, PYYKKÖ P. The periodic table and the physics that drives it[J]. Nat Rev Chem, 2020,4: 359–380. doi: 10.1038/s41570-020-0195-y

[2] HOFMANN S, HEINZ S, MANN R, et al.. Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120[J]. Eur Phys J A, 2016,52: 180. doi: 10.1140/epja/i2016-16180-4

[3] KHUYAGBAATAR J, YAKUSHEV A, DÜLLMANN C E, et al. Search for elements 119 and 120[J]. Phys Rev C, 2020,102: 064602. doi: 10.1103/PhysRevC.102.064602

[4] GAN Z G, HUANG W X, ZHANG Z Y, et al. Results and perspectives for study of heavy and super-heavy nuclei and elements at imp/cas[J]. Eur Phys J, 2022,58: 158. doi: 10.1140/epja/s10050-022-00811-w

[5] LIU S H, WANG Z J, JIA H, et al. Physics design of the ciads 25mev demo facility[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2017,843: 11–17. doi: 10.1016/j.nima.2016.10.055

[6] WANG Z, HE Y, JIA H, et al. Beam commissioning for a superconducting proton linac[J]. Phys Rev Accel Beams, 2016,19: 120101. doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.120101

[7] HE Y, WANG Z G, QIN Z, et al. Development of accelerator driven advanced nuclear energy and nuclear fuel recycling[C]. In Proc.10th International Particle Accelerator Conference(IPAC2019), Australia: JACoW, 2019: 4389–4393. doi: 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUYPLS2

[8] SHENG L N, HU Q, JIA H, et al. Ion-optical design and multiparticle tracking in 3d magnetic field of the gas-filled recoil separator shans2 at cafe-2[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2021,1004: 165348. doi: 10.1016/j.nima.2021.165348

[9] XU S Y, ZHANG Z Y, GAN Z G, et al. A gas-filled recoil separator, shans2, at the china accelerator facility for superheavy elements[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2023,1050: 168113. doi: 10.1016/j.nima.2023.168113.

[10] KREJCIK P, AKRE R A, ALLISON S, et al. Timing and synchronization at the lcls[C]. In Proceedings of DIPAC 2007, Italy, 2007: 373–375. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54962554.

[11] OTAKE Y, OHSHIMA T, HOSODA N, et al. Llrf and timing system for the scss test accelerator at spring-8[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2012, 696: 151–163. doi: 10.1016/j.nima.2012.06.067

[12] BRITO J L N, MARQUES S R, TAVARES D O, et al. Status development of sirius timing system[C]. In Proceedings of ICALEPCS2015, Australia: JACoW, 2015: 1007–1010. doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2015-WEPGF128

[13] KOONPONG P , RUJANAKRAIKARN R. Timing system using FPGA for medical linear accelerator prototype at SLRI[C]. In Proc. of International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems (ICALEPCS'17), Spain: JACoW, 2017: 589–592. doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA079

[14] ZHANG Z H, ZHENG J, XUE S, et al. Time structure measurement of the ssrf storage ring using trxeol method[J]. Nucl Sci Tech, 2015,26: 040202. doi: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.040202.

[15] LI C, WANG J G, XUAN K, et al. Event-driven timing system based on mrf cpci hardware for hls-ii[J]. Nucl Sci Tech, 2015,26: 060401. doi: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.060401

[16] KAJI H, FURUKAWA K, IWASAKI M, et al. New event timing system for damping ring at SuperKEKB[C]. In Proceedings of ICALEPCS2015, Australia: JACoW, 2014: 1829. doi: 10.

18429/JACoW-IPAC2014-TUPRI109.
[17] GAGET A, GOUGNAUD F, GOHIER F, et al. MRF Timing System Design at SARAF[C]. In Proc. ICALEPCS'21, Shanghai, China: JACoW, 2022: 912–915. doi: 10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-THPV022
[18] LIU M, YIN C X, ZHAO L Y, et al. Development status of sinap timing system[C]. Proceedings of IBIC2014, California, USA, 2015: 199–201. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61732332.
[19] LIU M, DAI X L, YIN C X, et al. Preliminary design of a femtosecond timing system for large accelerator facilities[J]. Nucl Sci Tech, 2018,29: 32. doi: 10.1007/s41365-018-0369-1.

Design of Timing and Synchronization System at The CAFE-2

Li Jingyu[1,2], Yang Feng[1], Guo Yuhui[1], Chen Youxin[1], Cui Wenjuan[1], Li Jiaosai[1],

(1 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: CAFE-2 is a superconducting linear accelerator built by the Institute of Modern Physics of the Chinese Academy of Sciences (IMP) in 2021 to carry out research on new superheavy nuclides synthesis, chemical properties of superheavy elements, and the structure and properties of superheavy nuclei. The synchronized timing trigger system is an important subsystem of CAFE-2 and plays a key role in the operation of CAFE-2. The CAFE-2 main synchronization timing system adopts the classical event-based timing system. At the same time, in order to meet the needs of different operation timing and synchronization triggering of CAFE-2 in both accelerator commissioning and terminal operation modes, the synchronization trigger signal of the rotating target modulation is coupled with the main timing CW(Continuous-wave) trigger signal in the terminal operation mode through the design of the coupling circuit and interlocking logic. The problem of different trigger signal sources for CAFE-2 in accelerator commissioning and terminal operation modes is solved. This paper introduces the structure of CAFE-2 synchronous timing trigger system, and describes the principle and scheme of CAFE-2 synchronous timing trigger system in different operation modes.

Key words: Superconducting Linear Accelerator; Superheavy Element; Timing System; Synchronous Trigger; CAFE-2; Rotating Target; Operation Mode

---

Foundation item: the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(Approval number: XDB34010000)

Corresponding author: Yang Feng, E-mail: yangf@impcas.ac.cn